

文章编号: 1007—4252(2008)01—0241—05

## 场发射真空传感器

文尉任, 王凌云, 孙道恒

(厦门大学机电工程系, 厦门 361005)

**摘要:** 场发射真空传感器是采用 MEMS 加工工艺研制一种新型的基于硅尖阵列场发射原理的微型真空传感器。通过理论分析, 确立了该种传感器中硅尖场发射电流与真空度的关系。并利用干法刻蚀工艺, 在硅片上制作了高  $3.2\mu\text{m}$ 、曲率半径小于  $70\text{nm}$  的  $200\times 42$  硅尖阵列。保持阳极与硅尖距离为  $1\mu\text{m}$  的情况下, 可以观察到阳极电压为  $10\text{V}$  左右时开始有明显的场发射电流。实验结果表明, 在  $10\text{V}$ — $15\text{V}$  的输入电压范围内, 通过测试场发射电流所得到的真空度值, 其最大误差不超过  $10\%$ 。该真空传感器具有制作简单、易于集成、信号测量容易、自身不带密封腔等优点, 具有潜在的应用前景和市场潜力。

**关键词:** 硅尖阵列; 场发射; 真空传感器

**中图分类号:** TP212 **文献标识码:** A

Field emission vacuum sensor

WEN Wei ren, WANG Ling Yun, SUN Dao heng

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen

University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** A micro vacuum sensor based on field emission of silicon tips array is brought forward firstly by integration of the MEMS technology. The relation between emission current and pressure has been introduced by theoretical analysis.  $200\times 42$  tips array with  $3.2\mu\text{m}$  height and below  $70\text{nm}$  diameter has been fabricated on the silicon substrate using dry etching process. Keeping  $1\mu\text{m}$  distance between the silicon tips and anode electrode, the emission current can be observed at  $10\text{V}$  anode voltage. From test results, the micro vacuum sensor has a lower error with the range of  $10$ — $15\text{V}$ , which less than  $10$  percent can be achieved. Because this micro vacuum sensor is characterized of high sensitivity, easiness for integration and no sealing chamber in the sensor, it has very promising applications and potential market.

**Key words:** silicon tips array; field emission; vacuum sensor

收稿日期: 2007—07—20 修订日期: 2007—09—22

基金项目: 国家自然科学基金 (No 50675184); 福建省科技计划重点项目 (No 2002H022) 回国留学人员基金; 厦门大学新世纪优秀人才基金资助。

作者简介: 孙道恒 (1964—) 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为微纳米系统制造技术等 (E-mail: sundk@xmu.edu.cn).

## 0 引言

从 1962 年第一个硅微型传感器问世以来<sup>[1]</sup>, 微型传感器因其尺寸小、测量精度和灵敏度高而广泛应用于工程、医学、生物和航空等各个领域。随着 MEMS 技术的深入发展, MEMS 技术在真空测量领域也得到了广泛应用, 它使得微型真空传感器的制作成为了可能。国外早在二十世纪八十年代就已经开始了对微型真空传感器的研究, 最开始研究得较多的是热传导式微型真空传感器<sup>[2]</sup>, 随着 MEMS 技术的飞速发展, 越来越多重要的测量原理在微型真空传感器的研制中得到了应用, 薄膜式<sup>[3][4]</sup>、力摩擦式<sup>[5]</sup>、离子式<sup>[6]</sup>、真空微电子式<sup>[7]</sup>等类型的微型真空传感器相继问世。

本文研制的场发射真空传感器是一种以真空微电子学中的场发射现象作为输出敏感方式, 利用 MEMS 技术制作的, 用于测量真空度大小的传感器。其结构简单, 具有灵敏度高、信号易检测、自身不带密封腔、易于集成、便于批量化生产等优点, 在诸如真空设备、航空航天装置、医疗器械等需要真空测量的领域中都具有巨大的市场潜力, 特别是集成在真空封装的微器件里用作微器件可靠性检测方面, 具有广泛的应用前景。

## 1 理论基础

场致发射可以用 Fowler-Nordheim 方程来描述

$$J = (AE^2 / (\phi^2 \gamma(Y))) \times \exp(-B\phi^{3/2} \gamma(Y)/E) \quad (1)$$

式中,  $J$ —电流密度 ( $A/m^2$ );

$E$ —锥尖发射区域的电场强度 ( $V/cm$ );

$\phi$ —功函数 ( $eV$ );

$\gamma$ —功函数势垒的肖特基降低;

$A = 1.54 \times 10^{-6}$ ,  $B = 6.84 \times 10^7$ ;

$\gamma = 3.79 \times 10^{-4} E^{0.5} / \phi$ ;

$\gamma(Y)$ 、 $\gamma(Y)$ —诺德海姆椭圆函数, 在大多数情况下,  $\gamma(Y) \approx 0.95 - Y^2$ ,  $\gamma(Y) \approx 1.1$ 。由该方程可见, 决定场致发射电流密度大小的主要参数有两个: 逸出功和电场强度。

发射体材料功函数理论上是一个固定值, 但是在实际的场发射过程中, 由于材料表面气体分子吸附与解吸附现象的存在会影响电子最终的实际逸出功。材料表面单位面积气体分子吸附量  $\sigma$  (分子数/ $cm^2$ ) 与发射体功函数有如下关系式<sup>[8][9]</sup>:

$$\phi_1 = \phi + \phi \quad (2)$$

式中,  $\phi_1$ —表面有分子吸附时的功函数;

$\phi$ —表面干净 ( $\sigma = 0$ ) 时的功函数;

$C$ —常数。

真空技术中的吸附现象, 可以用亨利定律来解释<sup>[10]</sup>:

$$\sigma = \frac{p}{\sqrt{2\pi m k T}} \cdot \tau_0 \exp(-q/RT) \quad (3)$$

式中,  $p$ —真空度 ( $Pa$ );

$m$ —气体分子质量 ( $kg$ );

$k$ —波尔兹曼常数;

$\tau_0$ —吸附态分子垂直于表面的振动周期 (一般约为  $10^{-12} \sim 10^{-14} s$ );

$q$ —吸附热 (千卡/克分子);

$R$ —气体普适常数。

从式 (1)、(2) 和 (3) 可见随着压强的降低, 发射材料实际功函数将会减小, 实际场发射电流将会有增大的趋势, 见图 1。

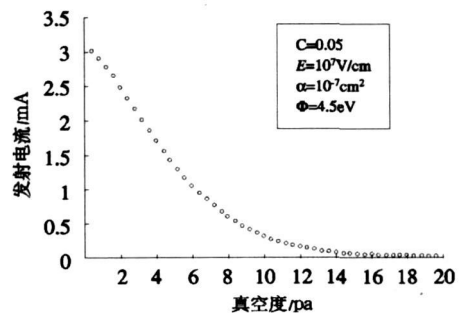


Fig 1 Evolutional chart of  $I-P$

图 1 场发射电流与真空度之间关系仿真图

## 2 传感器样机的制作

利用 MEMS 加工工艺制作得的场发射真空传感器样机的结构是一个典型的二极管式的场发射结构, 由金属阳极、阴极硅尖阵列以及支撑台三部分构成, 制作流程见图 2 具体方法是:

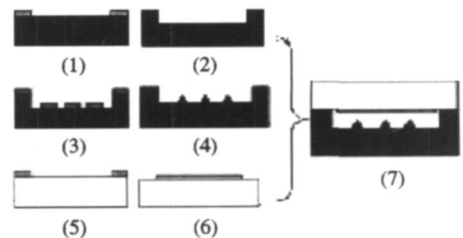


Fig 2 Schematic of prototype sensor

图 2 传感器样机制作流程图

(1) 在 4 英寸的 N 型 (100) 晶向的硅片上进行第一次光刻, 得到支撑台的掩膜图形;

(2) 以光刻胶作为掩膜, 利用 ICP 工艺刻蚀出 1 微米高的支撑台;

(3) 进行第二次光刻, 然后根据光刻出的掩膜图形溅射金属铝, 剥离以后, 就在衬底上得到一个  $200 \times 42$  的直径为 4 微米的圆形铝掩膜阵列;

(4) 利用 ICP 工艺刻蚀出  $200 \times 42$  的硅尖阵列<sup>[11]</sup>, 硅尖高约 3.2 微米, 曲率半径小于  $100 \text{ nm}$  见图 3;

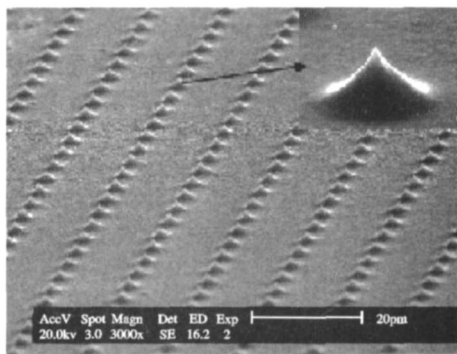


Fig 3 SEM of silicon tips array

图 3 硅尖阵列 SEM图

(5) 以 4 英寸的 Pyrex7740 玻璃作为衬底, 进行光刻工艺, 在其上光刻出阳极以及阳极引出电极图形;

(6) 溅射  $2000 \text{ \AA}$  的金作为阳极金属, 为了加强金与基底的黏附性, 需要先在基底上溅射约  $200 \text{ \AA}$  的钛作为过渡层;

(7) 将制作有硅尖阵列硅片与制作有阳极的玻璃片利用硅—玻键合工艺键合, 形成二极管式的场发射结构; 利用 TMAH 腐蚀液减薄硅片后, 在硅片

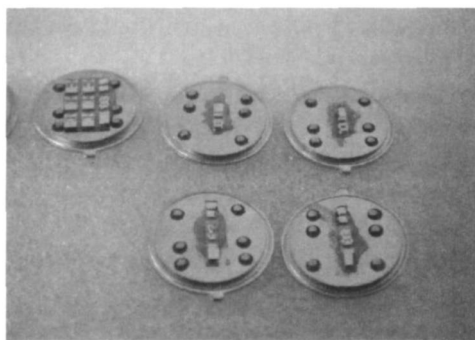


Fig 4 View of prototype sensor

图 4 传感器实物图

背面光刻出阴极引出电极的图形, 溅射金作为阴极引出电极; 以阴极引出电极的金膜作为保护膜进行深硅刻蚀将多余的硅去掉使阳极引出电极露出; 传感器实物见图 4。

### 3 传感器样机的测试与分析

利用 Keithley 公司生产的 4200—SCS 型半导体特性测试系统对制作的传感器样机进行 I—V 特性测试, 得到一条光滑的 I—V 特性曲线 (如图 5)。当阳极电压达到 18 V 时, 电流强度可达约  $70 \text{ mA}$ 。平均单个硅尖电流强度达到约  $8.3 \mu\text{A}$ 。

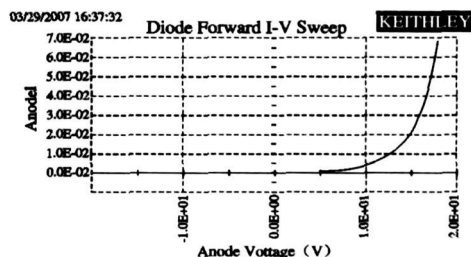


Fig 5 Characteristics curve of I—V

图 5 I—V 特性图

图 6 是所测得的 I—V 特性的 F—N 曲线图, 由图可知, 当输入电压在  $0.2 \sim 10 \text{ V}$  左右时, 输出电流的 F—N 曲线不是一条斜率为负的直线, 在这个区域测得的电流不符合场发射规律, 因此不是场发射电流; 当电压高于  $10 \text{ V}$  时, F—N 曲线近似于一条斜率为负的直线, 表明在这个区域测得的电流符合场发射的规律, 是场发射电流。因此, 可以得出所制作的传感器样机的场发射开启电压在  $10 \text{ V}$  左右。

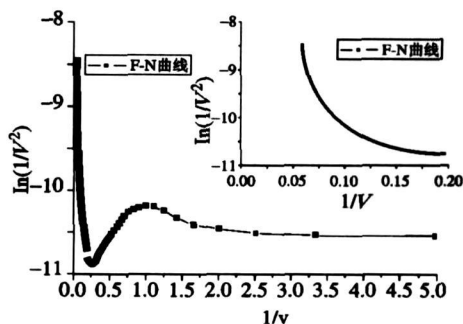


Fig 6 F—N curve

图 6 F—N 曲线图

为了测试所制作的传感器样机的发射电流与真空度之间的关系, 本文搭建了如图 7 所示的测试系统, 主要由外接电路、真空测试腔以及真空系统三部分组成。

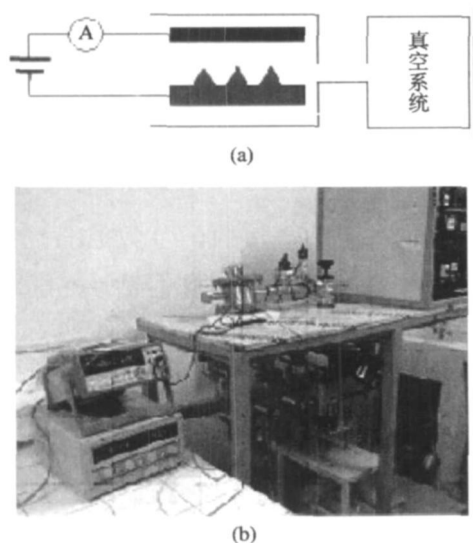


Fig 7 View of testing system: (a) schematic view; (b) practice view

图 7 测试系统图: (a) 测试系统示意图; (b) 测试系统实物图

外接电路部分主要由电源以及电流计两部分组成。实验中使用的电源是国电亚光电源技术有限公司生产的型号为 HY1711-2S 的直流稳压电源, 输出范围  $0 \sim 60\text{V}$ , 电流计是 Agilent 公司生产的 34410A 型六位半的数字万用表, 测量直流电流的精确度可达  $1\text{nA}$ 。传感器样机安装在真空测试腔里, 通过测试腔的引出电极与外部的电路连接, 真空系统主要由抽取真空用的分子泵及其测量系统组成。

利用搭建的测试系统, 在室温下, 动态真空环境中, 测试了传感器样机在  $20\text{Pa}$ 、 $10\text{Pa}$ 、 $0.2\text{Pa}$ 、 $0.1\text{Pa}$ 、 $0.05\text{Pa}$  等几个不同真空度下的输入 ( $V$ )—输出 ( $I$ ) 特性, 测试曲线如图 8 所示。

由图可见, 随着真空度的变化, 传感器的输入 ( $V$ )—输出 ( $I$ ) 曲线也随之有规律地变化。即相同的输入电压下, 真空度越高传感器输出电流越大。但是在  $0.1\text{Pa}$  和  $0.2\text{Pa}$  的两条曲线末尾有交叉的现象存在, 原因在于此时所加电压偏高 ( $22\text{V}$ ), 导致输出电流波动加剧, 出现曲线交汇的现象。因此在测试过程中要注意控制输入电压的大小, 保证输出电流的稳定性。

在上述测量得到的数值中, 选取输入电压为  $15\text{V}$  时的测量数值, 以真空度为横坐标, 以传感器样机的输出电流为纵坐标, 得到传感器输出电流与真空度大

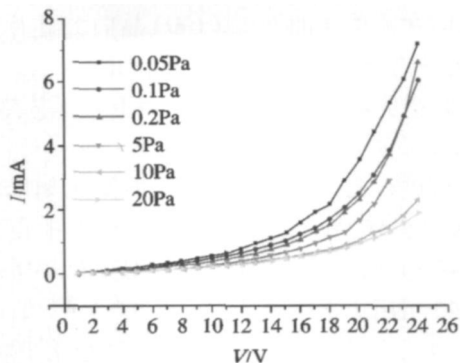


Fig 8  $I-V$  curve at different pressure

图 8 在不同真空度下的  $I-V$  曲线

小的关系曲线, 见图 9 由图可见随着真空度的提高传感器输出电流也会有随之增大的趋势, 因此通过测量传感器输出电流的大小就能间接得出真空度的大小, 达到测量真空度的目的, 而且真空度越高传感器输出电流越大, 其灵敏度也就越高。如当真空度为  $0.2\text{Pa}$  时传感器输出电流为  $0.905\text{mA}$  当真空度为  $0.1\text{Pa}$  时, 输出电流为  $1.027\text{mA}$  真空度提高了  $0.1\text{Pa}$  而输出电流增大  $0.122\text{mA}$  当真空度为  $0.05\text{Pa}$  时, 输出电流为  $1.301\text{mA}$  真空度提高了  $0.05\text{Pa}$  而输出电流增加了  $0.274\text{mA}$ 。该变化趋势与图 1 通过理论分析所得到的变化趋势基本一致。

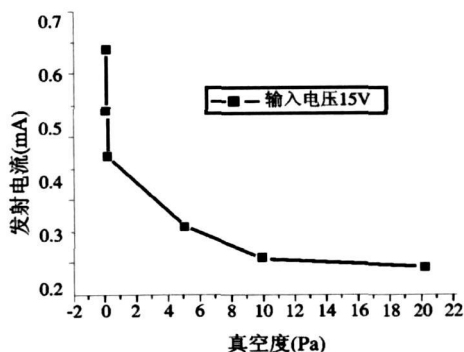


Fig 9  $I-P$  curve

图 9 真空度与发射电流之间的关系曲线

## 4 结论

利用硅尖阵列场发射电流大小随真空度变化而变化的现象, 研制了一种基于硅尖阵列场发射原理的场发射真空传感器。利用 MEMS 加工工艺制作出传感器样机, 并搭建测试系统测试其特性。通过实验发现, 随着真空度的提高, 传感器输出电流也会随之增大, 而且真空度越高输出电流越大, 分辨率、

灵敏度越高。

## 参考文献:

- [1] Hiroyuki Fujita. A decade of MEMS and Its future [A]. Proceedings of the 10th IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems [C]. 1997. 1—7.
- [2] Bruce C S Choy, Yeong—Maw Chen. A sensitive Pirani vacuum sensor and the electrothermal SPICE modeling [J]. Sensor and Actuators A. 1996. 53. 273—277.
- [3] Hemmi H, Shoji S, Yosimi K, et al. Vacuum package for microresonators by glass—silicon anodic bonding [A]. 7th International Conference on Solid—State Sensor and Actuators [C]. 1993. 584—587.
- [4] 王跃林, Esashi M. 新型力平衡微机械真空传感器研究 [J]. 真空科学与技术, 1999. 19(4): 304—311.
- [5] 金心宇, 张昱, 周绮敏, 等. 硅微机械谐振传感器稳幅真空计的研究 [J]. 仪表技术与传感器, 1999. 14—16.
- [6] Dan Năcolescu, Valeriu Filip, Fumio Okuyama. A conceptual design for a microelectronic ionization vacuum gauge [J]. Applied Surface Science, 1998. 126. 292—302.
- [7] Lee H C, Huang R S. Transducers 91 [M]. San Francisco. 1991. 241—244.
- [8] 赵子玉, 送焕生, 江秀臣, 等. 一种测量真空开关灭弧室真空度的新方法 [J]. 中国电机工程学报, 2006. 26(16): 144—149.
- [9] 胡汉泉, 王迁. 真空物理技术及其在电子器件中的应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- [10] 高本辉, 崔素言. 真空物理 [M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [11] 郑志霞, 冯勇建, 张春权. ICP刻蚀技术研究 [J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2004. 43. 365—368.